Tome 1

Théorie et pratique de la géotechnique

Outils pour la conception des ouvrages

Sous la direction de Claude Plumelle

EXPERTISE TECHNIQUE

EDITIONS LE MONITEUR

2e édition

Tome 1

Théorie et pratique de la géotechnique

Outils pour la conception des ouvrages

Sous la direction
de Claude Plumelle

Yu Jun Cui
Denis Fabre
Olivier Fouché
Alain Hirschauer
Claude Plumelle
Alain Tabbagh

2e édition

EXPERTISE
TECHNIQUE



Directrice des éditions : Claire de Gramont
Directeur éditorial : Thierry Kremer
Éditrice : Carole Trochu
Édition et coordination des illustrations : Alain Bouteveille
Édition déléguée : Michel Zelvelder
Conception de la maquette : Catherine Lattuca
Réalisation de la couverture : STDI (David Poidvin)
Mise en pages : Michel Zelvelder
Réalisation des illustrations : STDI (Shishu Vilmain, Kathy Lesueur, Julie Kroschwald, Agnès Hémeury, Charlène Gartion), Alexandre Camier
Fabrication : Anne-Lise Lapoire

ISSN : 2262-5089
ISBN papier : 978-2-281-14026-2



Présentation des auteurs

Directeur de recherche et professeur à l'École des Ponts ParisTech (ENPC), **Yu Jun Cui** est spécialisé en mécanique des sols non saturés et en ses applications dans les domaines du stockage des déchets nucléaires, de l'interaction sol-végétation-atmosphère, de la géotechnique ferroviaire, de la construction des remblais, de l'utilisation des sols traités [Chapitres 7, 11, 12, 14, 15, 18].

Professeur à la chaire de géotechnique du Cnam, **Denis Fabre** enseigne et a ses activités de recherche en géologie de l'ingénieur et en mécanique des roches. Il participe également à la formation des ingénieurs de Polytech Grenoble et de l'école Hassania à Casablanca, et contribue au master des travaux en souterrain de l'Aftes [Chapitre 1].

Maître de conférences à la chaire de géotechnique du Cnam, **Olivier Fouché** enseigne l'hydrogéologie. Rattaché à l'École des Ponts ParisTech (ENPC), il coordonne un projet de recherche sur les fonctions des sols en ANC et participe à un projet de modélisation hydrogéologique des nappes en milieu urbain [Chapitres 2, 13, 16].

Expert judicaire, **Alain Hirschauer** a fait toute sa carrière au Cete Île-de-France où il était chef de la section géologie-risques naturels ; parallèlement professeur associé à la chaire de géotechnique du Cnam, il a enseigné la géologie du génie civil, la reconnaissance des sols et les travaux géotechniques [Chapitre 4].

Professeur honoraire du Cnam, **Claude Plumelle** a eu une carrière d'enseignant, d'ingénieur-conseil et de chercheur. Il a dirigé la chaire de géotechnique du Cnam de 1994 à 2005, période au cours de laquelle il a développé le cursus d'ingénieur géotechnicien de cet établissement et créé, avec l'université Paris VI, le master commun géologie-géotechnique. Dans ses activités en recherche-développement, il a été très impliqué dans les projets nationaux : Clouterre, Forever et Asiri [Chapitres 5 à 11, 13 à 15, 17 et 18].

Professeur émérite à l'université Sorbonne Université, **Alain Tabbagh** a enseigné en école d'ingénieur, en diplôme d'études supérieures spécialisées et en master, la prospection géophysique du sous-sol peu profond pour les applications au génie civil, à l'hydrogéologie, à l'étude des sols et des formations superficielles et à l'archéologie [Chapitre 3].

Introduction

Tout ouvrage (infrastructures, génie civil, bâtiment, etc.) est en interaction avec son environnement géotechnique. L'ingénierie géotechnique est donc une composante de la maîtrise d'œuvre générale indispensable à l'étude, puis à la réalisation de tout projet. Elle doit être associée aux autres ingénieries à toutes les étapes successives d'étude et de réalisation d'un projet et ainsi contribuer à une gestion efficace des risques géologiques afin de fiabiliser le délai d'exécution, le coût réel et la qualité des ouvrages géotechniques.

Le sous-sol est, de par sa nature, le domaine privilégié des incertitudes, des variabilités et des aléas (événements géologiques non prévisibles et d'extension limitée). L'objectif des missions géotechniques est de réduire les risques géologiques avec une approche graduée et progressive des missions.

Il faut rappeler qu'une bonne adaptation du projet au contexte géologique du site est nécessaire pour construire en sécurité de façon économique. Malheureusement, c'est encore trop souvent le sol qui doit s'adapter au projet quand le concepteur entreprend trop tardivement les études géologiques, hydrogéologiques et géotechniques. Enfin, l'expérience montre que tout investissement fait par le maître d'ouvrage en phase de conception pour la maîtrise des risques géologiques est hautement rentable, comme cela a été démontré dans la construction des tunnels par exemple.

Les normes géotechniques se sont largement développées ces dernières années et forment un vaste corpus. Les normes NF EN, NF ISO, NF EN ISO s'imposent aux normes NF ; par contre, les normes XP n'ont qu'un caractère expérimental. La mention EN indique que la norme a été élaborée par le CEN et la mention ISO par l'ISO. Il n'existe pas de normes ISO ou EN, ces normes sont obligatoirement transcrites par les organismes nationaux de normalisation. Les normes en génie civil, hormis celles liées à la réglementation sismique, au feu et à la sécurité publique ne sont pas obligatoires en France. Elles le deviennent dans le cadre d'un contrat signé entre deux parties, les normes étant d'application volontaire. D'autres référentiels peuvent être utilisés sous réserve que l'assurance donne son accord.

La conception et le dimensionnement d'un ouvrage nécessitent la mise au point d'un modèle géotechnique dont les caractéristiques proviennent des résultats d'essais acquis lors des investigations géotechniques (figure 1).

Concernant la conception et le dimensionnement d'un ouvrage géotechnique, on appliquera la norme nationale française NF EN 1997-1/A1 (P 94 – 251-1/A1) d'avril 2014, qui est l'application nationale de la norme européenne Eurocode 7 : Calcul géotechnique – Partie 1. Règles générales de juin 2005, complétée par l'amendement A1 d'avril 2014.

La norme nationale française NF EN 1997-2 (P 94 – 252) de septembre 2007 est l'application nationale de la norme européenne Eurocode 7 : Calcul géotechnique – Partie 2. Reconnaissance des terrains et essais de juin 2006. Elle fournit des indications sur la planification et

l'exploitation des essais géotechniques utilisés pour servir de base aux calculs géotechniques des ouvrages. Cette norme est à utiliser conjointement avec la norme de conception NF EN 1997-1/A1 (P 94 – 251-1/A1).

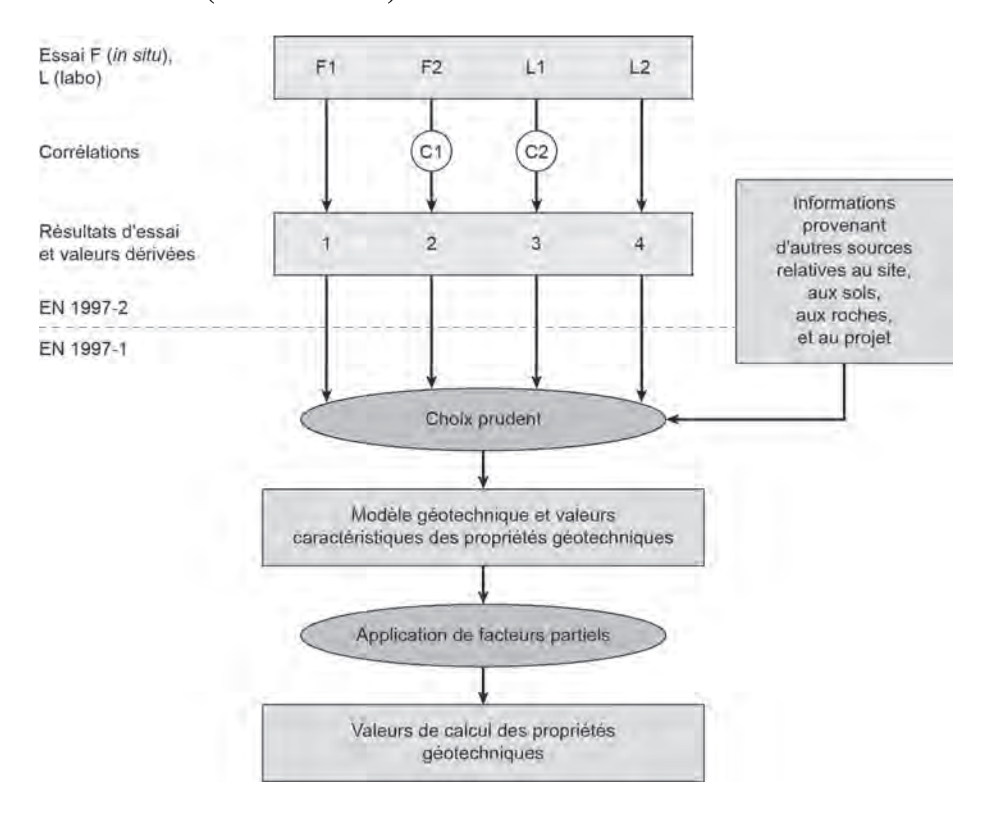


Figure 1. **Cadre général pour le choix des valeurs dérivées des propriétés géotechniques d'après EC7-2**

Pour les normes d'essais de laboratoire et *in situ*, on remarquera, dans la norme NF EN 1997-2 (P 94 – 252), la note indiquant : « La bibliographie fournit une liste de spécifications techniques CEN ISO/TS qui donnent des informations sur des modes opératoires, appareillage, évaluation et présentation de quelques essais de laboratoire et en place. Ces spécifications techniques peuvent devenir à terme des normes EN ISO. L'organisme national de normalisation peut rendre valide nationalement une spécification technique CEN ISO/TS, mais peut conserver en parallèle à une spécification technique des normes nationales en contradiction avec cette TS. Des annexes nationales à la norme EN 1997-2 peuvent fournir des informations vis-à-vis de la pratique nationale concernée. »

On constatera qu'en 2017 on a des normes, NF, NF EN, NF EN ISO, XP F, XP CEN ISO et qu'un grand nombre d'entre elles sont encore en révision ou à l'état de projet. On renvoie au

site http://www.geotechnique.org du Comité français de mécanique des sols et de géotechnique (CFMS), qui met à jour chaque année la liste des normes françaises.

Quant à la norme NF P 94-500 « Missions d'ingénierie géotechnique », elle contractualise les rapports entre la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre, les entreprises et l'ingénierie géotechnique.

Révisée en novembre 2013, elle a pour objet de définir les différentes missions types de l'ingénierie géotechnique et leur enchaînement. Elle a été calée au plus près de la loi MOP (Maîtrise d'ouvrage publique) de juillet 1985.

Au départ, le maître d'ouvrage définit le programme de l'opération et fixe l'enveloppe financière. Il détermine le ou les ouvrages à construire, surfaces, descentes de charges, critères de fonctionnement et fixe un planning des études et de réalisation des travaux. Le maître d'œuvre assure la conception générale de l'ouvrage ; il élabore le projet, établit les plans, notes techniques des structures, en intégrant les éléments fournis par l'ingénierie géotechnique au fur et à mesure de l'avancement et de la réalisation du projet.

La conception et la réalisation du projet géotechnique comprennent trois étapes, deux étapes de conception et une étape de réalisation. Toutes les étapes sont obligatoires et s'enchaînent. Pour plus d'efficacité et pour limiter les risques, il est fortement conseillé que l'ingénierie géotechnique soit la même pour les trois étapes, de la conception du projet à la réalisation et au suivi des travaux.

Les investigations géotechniques (études géologiques, hydrogéologiques, reconnaissances géophysiques et géologiques, essais *in situ* et essais de laboratoire) sont indispensables à chaque étape, elles sont décrites aux chapitres 1 à 5 et 13 à 16.

Conception d'un projet géotechnique

La phase de conception comporte deux étapes, une étape géotechnique préalable et une étape géotechnique de conception (tableau 1).

Il ne faut jamais supprimer l'étape préalable au prétexte de gagner du temps et d'éviter le coût des études correspondantes. Il ne faut pas non plus vouloir entreprendre les études G1 et G2 en même temps, les missions géotechniques doivent s'enchaîner, les conclusions d'une mission G_{n-1} permettant de définir les objectifs et un programme pertinent pour la mission G_n.

Au début de la conception du projet, le maître d'ouvrage ou son mandataire doivent missionner une ingénierie géotechnique (mission G1/ES) pour effectuer les études préalables.

Le tableau 1 présente les différentes phases de la conception d'un projet géotechnique, chaque phase est développée ensuite.

Tableau 1. Conception du projet d'ouvrage géotechnique

Étapes	Phases de la maîtrise d'œuvre	Missions d'ingénierie géotechnique	Objectifs à atteindre
1 Étude géotechnique préalable (G1)		Étude de site (ES)	Spécificités géotechniques du site Première identification des risques majeurs
	Étude préliminaire d'esquisse (APS)	Principes généraux de construction (PGC)	Premières adaptations des futurs ouvrages aux spécificités du site
2 Étude géotechnique de conception (G2)	APD/AVP	Avant-projet (AVP)	Définition et comparaisons des solutions envisageables pour le projet
	PRO	Projet (PRO)	Conception et justifications du projet retenu
	DCE/ACT	Document de consultation des entreprises (DCE) Assistance pour l'établissement des contrats de travaux (ACT)	Consultation sur la technique de base retenue et ouverture à variantes Choix de l'entreprise Mise au point des contrats de travaux

Étape 1 : Étude géotechnique préalable (mission G1)

Cette mission est nécessaire pour initier le projet géotechnique, mais elle n'est pas suffisante pour définir et dimensionner le projet retenu. Pour cela, la mission G1 doit être suivie de la mission G2 de conception.

À l'étape 1, l'étude préalable G1, à la charge du maître d'ouvrage, comprend deux phases :

- **La phase « Étude de site » (ES)**, qui est à lancer avant l'étude préliminaire ou l'APS de l'ouvrage ; généralement, elle est commandée par le maître d'ouvrage avant désignation d'un maître d'œuvre. Cette étude géotechnique préliminaire de site permet une première identification des risques géologiques. Elle nécessite une enquête documentaire détaillée. Elle fait l'objet obligatoirement d'une visite du site et peut être accompagnée si nécessaire d'investigations géotechniques. Cette première étude qualitative, d'un faible coût, est indispensable pour identifier les risques majeurs (sismicité, cavités, mouvements de terrain, zones de sols compressibles, inondations, pollutions des sols et de l'eau…). Le compte-rendu de cette étude doit définir, en particulier, le programme des investigations géotechniques à réaliser lors de la phase suivante (PGC).

- **La phase « Principes généraux de construction » (PGC)**, qui comporte des investigations géotechniques importantes. Les résultats de ces investigations permettent de déterminer les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l'étude préliminaire ou d'APS

de l’ouvrage. À cette phase, on peut présenter certains principes généraux de construction envisageables (par exemple, pour des ouvrages sur sols compressibles, préchargement, colonnes ballastées, inclusions rigides, *deep mixing method*). Cette phase n’inclut pas d’ébauche dimensionnelle.

À l’issue de cette étape, le maître d’ouvrage ou son mandataire assisté par l’ingénierie géotechnique retient une ou plusieurs solutions envisageables pour le projet.

Étape 2 : Étude géotechnique de conception (mission G2)

L’objectif de cette mission est la conception des différentes solutions envisageables pour le projet. Elle est à la charge du maître d’ouvrage et doit être réalisée en collaboration avec la maîtrise d’œuvre. L’étude géotechnique de conception G2 comporte trois phases (tableau 1) :

- **La phase avant-projet (AVP)**, qui contribue à la mise au point de l’ouvrage géotechnique. Elle peut nécessiter des investigations géotechniques complémentaires à celles effectuées en G1/PGC. Elle définit les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l’AVP et les principes de construction envisageables. Elle fournit une ébauche dimensionnelle et une première approche des quantités. À l’issue de cette phase, le maître d’ouvrage ou son mandataire assisté par l’ingénierie géotechnique retient un type d’ouvrage géotechnique qui constituera la solution de base étudiée dans la phase projet.

- **La phase projet (PRO)**, qui définit les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade du projet (valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques). Elle établit les notes techniques donnant les choix constructifs des ouvrages (travaux préparatoires, plates-formes de travail, phasages, dispositions par rapport aux ouvrages existants…). Elle fournit les notes de calcul de dimensionnement au niveau projet, ainsi qu’une approche des quantités, des délais et des coûts. Elle donne les valeurs seuils (déplacements, convergences, pressions interstitielles, efforts dans des tirants…) et conclut sur la pertinence de la méthode observationnelle ou méthode interactive de dimensionnement. Cette méthode est très utile et souvent utilisée pour garantir une meilleure gestion des risques géotechniques.

- **La phase DCE/ACT**, qui contribue à l’établissement du dossier de consultation des entreprises (DCE) et à l’assistance pour l’établissement des contrats de travaux (ACT) avec le ou les entrepreneurs. Elle établit ou participe à la rédaction des documents techniques nécessaires à la consultation des entreprises pour leurs études de réalisation (dossier de la phase PRO avec plans, notices techniques, critères de performance, notes de calcul, plans d’instrumentation, définition de la méthode observationnelle, cahier des clauses techniques particulières (CCTP), bordereaux de prix, planning prévisionnel). L’ingénierie géotechnique assiste la maîtrise d’ouvrage ou la maîtrise d’œuvre pour la sélection des entreprises, puis elle analyse les offres techniques (projet de base et variantes). Elle participe à la finalisation des pièces techniques définitives des contrats de travaux.

Réalisation du projet géotechnique

La réalisation du projet géotechnique comporte une phase « étude » et une phase « suivi » très importantes et indispensables pour les ouvrages géotechniques. Ces deux phases sont à la charge de l'entreprise adjudicataire sous la supervision de l'ingénierie géotechnique mandatée par le maître d'ouvrage ou son représentant (tableau 2).

Tableau 2. Réalisation du projet d'ouvrage géotechnique

Étape	Phases de la maîtrise d'œuvre	G3 (entreprise)	G4 (maître d'ouvrage)	Objectifs à atteindre
3 Études géotechniques de réalisation (G3/G4)	EXE/VISA	Phase Études	Supervision de l'étude géotechnique d'exécution	Études d'exécution conformes au projet
	DET/AOR	Phase Suivi	Supervision du suivi géotechnique d'exécution	Maîtrise des risques durant l'exécution des travaux et vérification des objectifs de l'ouvrage géotechnique

Étape 3 : Études géotechniques de réalisation

L'étape de réalisation des travaux de l'ouvrage géotechnique est entreprise après l'étude géotechnique de conception (G2 DCE/ACT) figurant dans le contrat de travaux. Elle comporte deux missions distinctes et simultanées :
– étude et suivi géotechnique d'exécution (mission G3), à la charge de l'entrepreneur qui réalise le chantier, l'entrepreneur peut sous-traiter cette mission à une ingénierie différente de celle de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre ;
– supervision géotechnique d'exécution (mission G4), à la charge de la maîtrise d'ouvrage ou de son mandataire en collaboration avec la maîtrise d'œuvre.

Étude et suivi géotechniques d'exécution (mission G3)

Par le suivi continu sur site des travaux, elle permet de confirmer le modèle géotechnique retenu pour la conception du projet. En cas de rencontre de conditions géotechniques ou de comportement des ouvrages géotechniques en cours de réalisation significativement différents de ceux prévus mais identifiés comme risques possibles, ce suivi permet d'adapter ou de modifier la partie correspondante de l'ouvrage et de recaler les modèles de calcul et/ou les méthodes d'exécution. Dans le cas de conditions géotechniques non identifiées au stade de l'étude, ce suivi permet de sécuriser l'ouvrage et les avoisinants, puis de procéder à la réalisation d'investigations géotechniques complémentaires nécessaires au diagnostic (mission G5)

et à la reprise correspondantes des études d'exécution G3 initiale ou de l'étude G2 si la conception est modifiée.

Elle se déroule en deux phases interactives.

Phase étude

L'entreprise étudie dans le détail la réalisation du chantier de l'ouvrage géotechnique.

Elle définit un programme d'investigations géotechniques spécifiques, si nécessaire, en fonction des données existantes et en assure le suivi technique et l'exploitation des résultats. Elle établit la note d'hypothèses géotechniques sur la base des données fournies par l'étude géotechnique de conception (G2 DCE/ACT) et le contrat de travaux ainsi que les résultats des éventuelles investigations prescrites ci-dessus.

Elle définit les ouvrages, leur dimensionnement, les notes de calcul justificatives, les plans d'exécution et établit les méthodes et les conditions d'exécution, le phasage, les spécifications et les plans correspondants.

Elle fournit le plan de suivi et contrôle des travaux avec description des auscultations à réaliser et des valeurs seuils, ainsi que des dispositions constructives complémentaires nécessaires en cas d'atteinte de celles-ci dans le cas de l'application de la méthode observationnelle.

Cette étude d'exécution doit être réalisée en amont des travaux correspondants et fait l'objet d'un visa de la maîtrise d'œuvre après avis de l'ingénierie géotechnique en charge de la mission G4.

Phase suivi d'exécution

Dans cette phase, l'entreprise procède ou fait procéder par une entreprise extérieure aux opérations de contrôle interne et externe.

Elle vérifie la conformité du contexte géotechnique rencontré avec celui pris en compte dans la phase étude.

Elle assure la mise en place de l'auscultation des ouvrages et toutes les mesures durant l'exécution des travaux et éventuellement après la livraison de l'ouvrage. Dans le cas d'application de la méthode observationnelle, elle applique les dispositions constructives prédéfinies en phase étude.

Dans le cas où les conditions géotechniques seraient plus favorables que celles envisagées dans la phase étude, elle propose la mise en œuvre des mesures d'optimisation prédéfinies en phase étude.

Elle établit un programme d'investigations géotechniques supplémentaires si nécessaire, le réalise et en assure le suivi et en exploite les résultats.

Elle établit au fur et à mesure les documents synthétiques précisant les conditions géotechniques rencontrées, le comportement des ouvrages en phase de construction et l’impact sur les avoisinants.

Elle établit la prestation géotechnique du dossier des ouvrages exécutés (DOE) et le dossier d’interventions ultérieures sur l’ouvrage (DIUO).

Supervision géotechnique d’exécution (mission G4)

La mission G4, à la charge du maître d’ouvrage, concerne la supervision géotechnique d’exécution dans le cadre de la maîtrise d’œuvre. Elle permet de vérifier la conformité de l’étude et le suivi géotechnique de l’entreprise aux objectifs du projet. La mission G4 comporte deux phases.

Phase supervision de l’étude

Cette phase permet de vérifier les documents établis par l’entrepreneur (mission G3 de l’entreprise). Elle consiste à vérifier et donner un avis sur les hypothèses géotechniques, les dispositions constructives de l’entreprise, les notes de calcul, les plans, les fiches produits, les programmes de suivi et d’auscultation y compris la méthode observationnelle.

Phase supervision du suivi d’exécution

Cette phase a pour objectif, par une intervention périodique et discontinue sur le chantier, de vérifier que le suivi géotechnique d’exécution, à la charge de l’entrepreneur, permet de confirmer à l’avancement des travaux le modèle géologique et le contexte géotechnique retenus ainsi que la similitude entre comportement prévu et comportement observé de l’ouvrage et des ouvrages avoisinants.

L’ingénierie géotechnique donne son avis sur les résultats des mesures des auscultations et vérifie la bonne application de la méthode observationnelle. Elle valide toute adaptation de l’ouvrage, tout changement de planning.

Diagnostic (mission G5)

Pendant le déroulement du projet, il peut être nécessaire de procéder de façon limitative à l’étude d’un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques.

Cette mission ne concerne strictement que l’ouvrage ou la partie d’ouvrage géotechnique spécifiée sans aucune implication dans la globalité du projet. Si ce diagnostic conduit à modifier tout ou partie du projet, des études géotechniques de conception et/ou d’exécution ainsi qu’un suivi et une supervision géotechnique seront réalisées ultérieurement.

L'étude géologique développée au chapitre 1 initie l'enchaînement des missions géotechniques dans les études géotechniques préliminaires. Elle est indispensable pour les grands ouvrages de génie civil, les ouvrages linéaires, les tunnels, mais elle ne doit pas être oubliée pour des ouvrages plus modestes, tels que bâtiments, voiries et réseaux divers. L'étude géologique permet d'identifier dès le départ, avant l'élaboration du projet, les grands risques géologiques : failles, zones de glissement, zones karstiques, terrains argileux, vallées compressibles, etc. ; elle guide souvent le choix et l'implantation des reconnaissances.

Références

XP P 94-010 (décembre 1996 – Indice de classement : P 94-010) Sols : reconnaissance et essais – Glossaire géotechnique – Définitions – Notations – Symboles.

NF P 94-500 (novembre 2013 – Indice de classement : P 94-500) Missions d'ingénierie géotechnique – Classification et spécifications.

Chapitre 1

Géologie des sols

Les ouvrages géotechniques concernent la plupart du temps la tranche superficielle de l'écorce terrestre sur une profondeur n'excédant qu'exceptionnellement une cinquantaine de mètres. Par ailleurs, ces ouvrages sont concentrés dans les zones urbanisées et particulièrement dans les grands centres urbains, c'est-à-dire, en général, dans des zones à faible relief en site alluvial (vallées) ou proches des rivages (plaines côtières).

Sur le plan géologique, cela implique que les terrains concernés par les aménagements sont très souvent constitués de la tranche superficielle altérée du substrat (terrains autochtones) et/ou de matériaux sédimentaires transportés, puis déposés par les cours d'eau et les courants côtiers (terrains allochtones). Pour le géologue, il s'agit de roches meubles, mais le vocabulaire a consacré plutôt le terme de sol, repris dans le vocable classique de mécanique des sols.

La reconstitution de l'histoire des sols permet souvent de comprendre leur organisation spatiale en couches ou lentilles (structure) ; et leur origine (nature) explique beaucoup de leurs propriétés géotechniques. Il nous a donc paru intéressant de donner brièvement, dans ce premier chapitre, quelques notions sur l'origine et l'histoire géologique des sols, utiles en vue de la réalisation des terrassements et des ouvrages de génie civil.

1.1 Minéraux et roches

1.1.1 Définitions de base

Même si une fraction organique peut exister dans certains sols (tourbe, etc.), ceux-ci sont principalement constitués de grains minéraux issus d'une roche préexistante. Les roches superficielles fournissent la matière nécessaire à l'élaboration de la quasi-totalité des matériaux de construction (pierres de taille, granulats routiers et à béton, métaux, ciment, chaux, plâtre, briques et tuiles, etc.), à l'exception de quelques produits d'origine organique (bois principalement et certaines matières plastiques dérivées du pétrole).

1.1.1.1 Minéral

Bien que minéral et cristal soient en général des notions associées, nous préférons les distinguer (il existe quelques rares cas de minéraux non cristallisés, voir § 1.1.1.2).

Un minéral est une substance solide (à la pression et à la température de la surface de la Terre), ayant une formule chimique bien définie, dans laquelle n'intervient pas d'association carbone-hydrogène. Les minéraux sont principalement composés des atomes les plus fréquents à la surface de la Terre : l'oxygène (47 %), le silicium (27 %), l'aluminium (8 %), le fer (5 %), le calcium (3,7 %), le sodium (2,8 %), le potassium (2,6 %), le magnésium (2,1 %), etc. En particulier, la famille la plus représentée est celle des silicates où figure, associé à d'autres atomes, le groupement SiO_4. On connaît aujourd'hui plus de 3 000 espèces minérales.

1.1.1.2 Cristal

Un cristal est un minéral structuré géométriquement à l'échelle de l'arrangement des molécules (figure 1.1). Il possède en conséquence une forme géométrique caractéristique, dont les dimensions peuvent atteindre quelques centimètres. Un minéral non cristallisé est un verre.

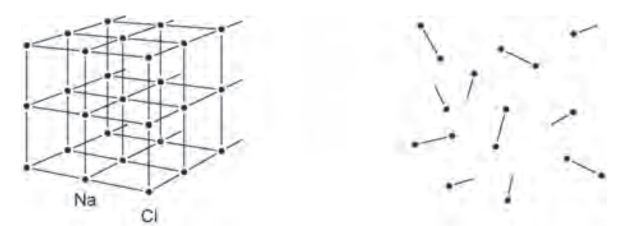


Figure 1.1. État cristallin (exemple du sel) et état amorphe

À la surface de la Terre, la matière minérale naturelle est le plus souvent cristallisée, mais les cristaux sont en général invisibles à l'œil nu (voir § 1.1.2.1). En fait, les verres naturels ne se forment que lors de certaines éruptions volcaniques, lorsque le refroidissement du magma initial liquide est trop rapide pour que la matière puisse s'organiser en se solidifiant.

La figure 1.2 montre quelques exemples de cristaux courants : le quartz (SiO_2), la calcite ($CaCO_3$), le gypse ($CaSO_4$, $2H_2O$).

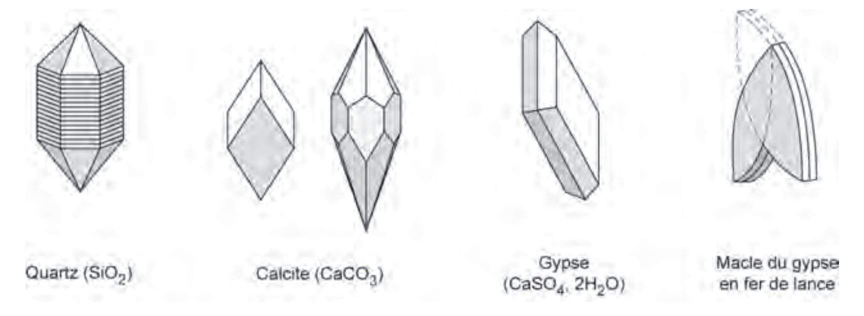


Figure 1.2. Cristaux courants : quartz, calcite, gypse (deux formes)

Il existe sept principaux systèmes cristallins, le plus simple à décrire étant le système cubique où les molécules occupent les sommets d'un cube de côté constant (la maille). Mais de nombreuses variétés faisant intervenir des arrangements entre parties de cristaux, à partir de défauts du réseau cristallin (les macles), font que la forme géométrique des cristaux est beaucoup plus variée que le nombre restreint des systèmes cristallins ne le laisse supposer. En fait, il est très rare que deux minéraux distincts aient la même forme cristalline.

Les propriétés optiques permettent l'identification des minéraux cristallisés : le dispositif classique utilise des lames minces (épaisseur de 30 µm) observées au microscope en lumière polarisée.

1.1.1.3 Roche

Les roches sont des agrégats polycristallins, associant des minéraux divers (voir la lame mince de la photo 1.1). Une roche est dite monominérale lorsqu'elle est composée à plus de 95 % du même minéral. En général, les roches sont constituées de quelques minéraux principaux et de plusieurs minéraux dits accessoires, en petites quantités parfois localisées (« impuretés »).

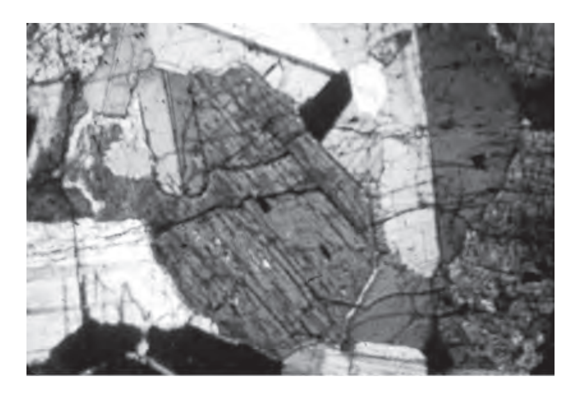


Photo 1.1. Lame mince dans une roche magmatique

Les gros cristaux sont centimétriques.

La très grande variété des minéraux et de leurs proportions au sein des roches et la nécessité d'avoir le plus souvent recours au microscope pour les distinguer font qu'il est peu commode d'utiliser la composition minéralogique comme critère de classification simple des roches.

1.1.2 Identification des minéraux importants

Nous indiquerons ici des moyens simples pour reconnaître les minéraux les plus courants. Une analyse visuelle fine et des tests simples renseignent rapidement sur des données fondamentales de nature (quartz, calcite, etc.) et de texture (taille et forme des grains) qui conditionnent les propriétés géotechniques.

1.1.2.1 Pouvoir séparateur de l'œil

C'est une notion physiologique très utile pour l'observation fine en général, qui présente un intérêt particulier pour le génie civil. L'œil humain est en effet susceptible de distinguer les particules de matière (les « grains »), pour peu que leur taille soit supérieure à environ 1/10e de mm (100 µm).

Cela est particulièrement intéressant pour l'analyse des sols et des matériaux de construction. Les « fines » (généralement indésirables pour la fabrication du béton), par exemple, sont les particules traversant le tamis à 80 µm ou 63 µm (dernier tamis de la colonne usuelle de tamis). Avec un peu d'exercice, on peut les distinguer visuellement des grains plus grossiers, évaluer leur importance et établir une granulométrie approchée applicable aux matériaux meubles (graves, sables, limons, etc.).

1.1.2.2 Observations simples : couleur, éclat, structure cristalline et clivages éventuels

La couleur n'est pas une caractéristique absolue d'un minéral et même d'un cristal, puisque d'infimes défauts de la structure, modifiant les propriétés optiques, ou la présence d'une impureté minérale colorée peuvent changer complètement sa couleur. Le cristal si caractéristique du quartz (prisme hexagonal pyramidé), normalement translucide (cristal de roche) peut apparaître sous des couleurs aussi variées que le blanc grisâtre (quartz commun), le noir (quartz enfumé), le violet (améthyste), le rose, etc.

L'éclat, c'est-à-dire l'aptitude à renvoyer la lumière, doit être apprécié sur une cassure fraîche de la roche (d'où l'un des intérêts du marteau de géologue). Il peut varier un peu pour les minéraux en fonction de la taille et de la forme des grains et, également, en fonction de leur état d'altération. Il est cependant intéressant d'utiliser une échelle qualitative à cinq niveaux :

1 – métallique ; 2 – vitreux ; 3 – gras ; 4 – mat ; 5 – terreux.

La structure cristalline, comme signalé plus haut, est caractéristique du minéral. Encore faut-il pouvoir distinguer les cristaux à l'œil nu. L'observation des cristaux et de leurs propriétés optiques est à la base de la détermination minéralogique sur lames minces de roches à l'aide du microscope optique (photo 1.1). Un trait important de certains cristaux est la présence en leur sein de plans de séparation (clivages) parallèles aux faces externes du cristal. On distingue ainsi des « débits » en parallélépipèdes (trois clivages) ou en plaques (un clivage).

1.1.2.3 Tests simples : dureté, comportement avec l'eau, réaction HCl dilué

Le test de dureté, qui consiste à frotter deux minéraux l'un contre l'autre et à examiner lequel des deux a laissé une empreinte (rayure) sur l'autre, est sans doute le premier test mécanique réalisé dans l'histoire des hommes pour rechercher la matière de base de leurs outils.

Il y a plus d'un siècle, une échelle de dureté minéralogique a été définie par Mohs. Elle comporte 10 niveaux :

1 – Talc ; 2 – Gypse ; 3 – Calcite ; 4 – Fluorine ; 5 – Apatite ;
6 – Orthose ; 7 – Quartz ; 8 – Topaze ; 9 – Corindon ; 10 – Diamant.

Le quartz (silice, silex, etc.) y apparaît comme la matière courante la plus dure que l'on puisse trouver facilement dans la nature. Cette échelle à 10 niveaux est cependant peu commode à utiliser. On emploie plutôt l'échelle réduite suivante :

2,5 – Ongle ; 5,5 – Acier ; 6,5 – Verre ; 7,8 – Carbure de tungstène.

Les valeurs données sont approximatives pour les aciers (entre 5 et 6 selon leur nature) et les verres (entre 6 et 7 selon leur nature). Cette échelle permet de classer les minéraux en cinq classes de dureté :

tendre ; mi-dur ; dur ; très dur ; extrêmement dur.

La matière tendre est rayée par l'ongle ; la mi-dure raye l'ongle, mais est rayée par l'acier ; etc.

Le comportement en présence d'eau est également un test très utile. Il permet de distinguer rapidement :
– un minéral très soluble (300 g/l), le sel (NaCl) ;
– une famille de minéraux hydrophiles, formant avec l'eau un amalgame un peu collant, les argiles (voir § 1.1.3).

Tableau 1.1. Caractéristiques et usages de quelques minéraux courants

Minéral	**Formule**	**Dureté (Mohs)**	**Système cristallin**	**Densité**	**Particularités et usages**
Quartz	SiO_2	7	Hexagonal	2,65	Très dur et abrasif Granulats, laine de verre
Orthose	$K(Si_3AlO_8)$	6	Hexagonal	2,56	Dur et résistant Granulats, grès cérames
Calcite	$CaCO_3$	3	Hexagonal	2,71	Résistant, mais non abrasif Chaux, ciments, granulats
Gypse	$CaSO_4, 2H_2O$	2	Mono-clinique	2,32	Peu résistant, soluble (2 g/l) Plâtre
Biotite	$K (Mg, Fe)_3 Si_3AlO_{10}(OH,F)_2$	2,5	Mono-clinique	2,80	Très brillant Réfractaire
Kaolinite	$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$	Non déter-minable	Mono-clinique	2,62	Très sensible à l'eau Céramiques, ciments

Un dernier test simple, sélectif comme les précédents, est couramment pratiqué : il s'agit de la réaction avec l'acide chlorhydrique dilué (*N*/10) à froid, qui n'est positive (effervescence) que sur un seul minéral courant, la calcite $CaCO_3$, selon la réaction :

$$CaCO_3 + 2\,HCl \rightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2\uparrow$$

Les réponses aux tests simples de minéraux usuels figurent avec leurs propriétés visuelles et leurs formules chimiques dans le tableau 1.1 à côté de leurs particularités et usages en construction.

1.1.3 Propriétés des minéraux argileux

Le terme argile est couramment défini, en mécanique des sols, par rapport à la taille des particules inférieures à 2 µm. Cette définition ne correspond pas exactement à celle du géologue (voir § 1.1.3.1). Elle est par ailleurs insuffisante pour la compréhension du comportement hydromécanique des sols argileux en général, et des phénomènes de retrait et de gonflement en particulier. Il existe en outre des sols composés de particules très fines, inférieures à 2 µm, mais peu argileuses au sens minéralogique (« farines de roche »). Par exemple, des « argiles sensibles » qui résultent du dépôt de ces particules peuvent être rencontrées, en particulier au Québec et dans les pays du nord de l'Europe.

1.1.3.1 Microstructure des argiles

Les argiles sont des phyllosilicates d'aluminium hydratés. Elles présentent une microstructure complexe, dont la description varie selon les auteurs. Nous avons adopté celle de D. Tessier de l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) qui distingue plans d'anions, couches, feuillets élémentaires, cristallites, particules et arrangement textural (Tessier, 1975, 1984).

Les plans d'anions

Les ions oxygènes et hydroxyles sont de grande taille (13,5 nm par exemple pour l'oxygène) par rapport à la plupart des cations (4,2 nm pour la silice, 5,1 pour l'alumine). De ce fait, ce sont ces éléments qui vont conférer à la structure son aspect caractéristique.

Il existe deux arrangements possibles. L'un, valable exclusivement pour les ions oxygènes O^{2-}, est un assemblage hexagonal ; l'autre, pour les ions O^{2-} oxygènes et hydroxyles OH^-, est un assemblage compact.

Les couches

Les couches sont des empilements de deux plans. On obtient des couches de tétraèdres (couche T) en superposant une couche hexagonale et une couche compacte. Les tétraèdres sont constitués d'un cation central de silicium Si^{4+} entouré de quatre anions O^{2-} aux sommets (figure 1.3).

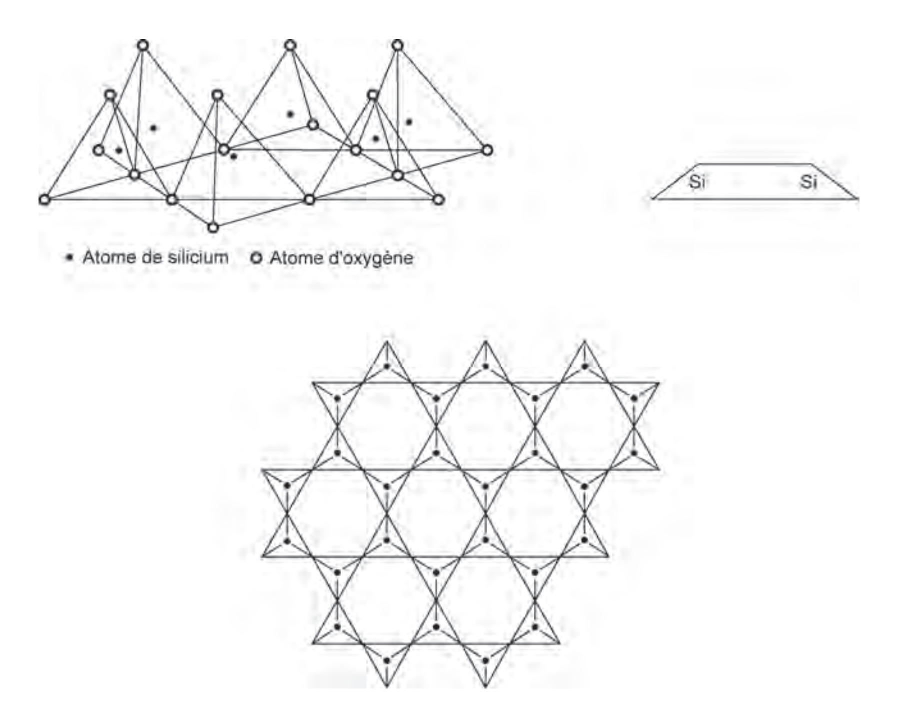


Figure 1.3. Couche tétraédrique de silice

On obtient des couches d'octaèdres (couche O) en disposant deux couches compactes l'une sur l'autre, décalées d'un rayon dans les deux directions. Les octaèdres sont constitués d'un cation aluminium Al^{3+} (ou Mg^{2+}, K^{+}, Fe^{3+}), entouré de six hydroxyles OH^{-} (figure 1.4).

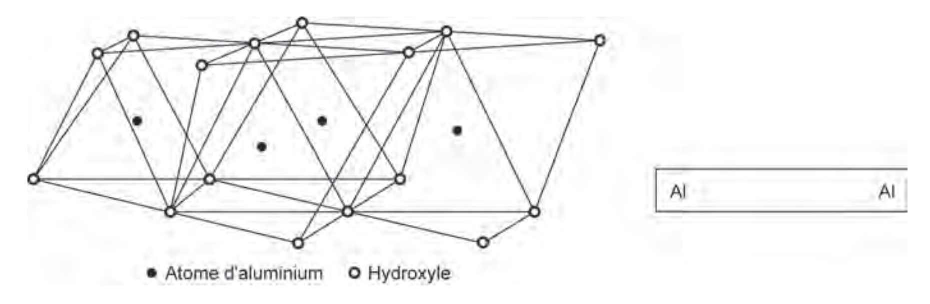


Figure 1.4. Couche octaédrique d'alumine

Les feuillets élémentaires

Les feuillets sont des superpositions de plans d'anions délimitant des couches tétraédriques et octaédriques. Les minéraux argileux sont classés en deux familles suivant le type de feuillet (figure 1.5).

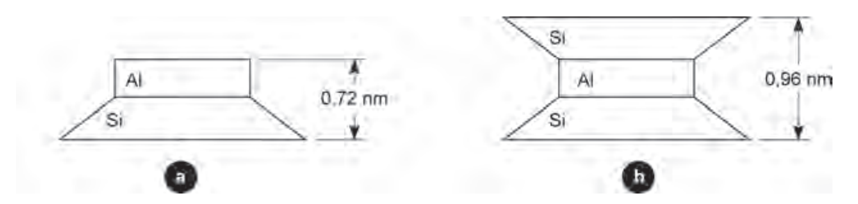


Figure 1.5. Types de feuillets des minéraux argileux
a. Schéma du feuillet 1/1. b. Schéma du feuillet 2/1.

Les feuillets 1/1 sont formés d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique (T-O), par exemple pour la kaolinite. Les feuillets 2/1 sont formés d'une couche octaédrique entourée de deux couches tétraédriques (T-O-T), par exemple pour les illites, smectites, chlorites. Les forces qui associent les éléments de chaque feuillet sont de nature ionique et sont stables.

Cristallites

Les feuillets sont très rarement isolés dans les argiles. La superposition de plusieurs feuillets forme un cristallite. On verra que les forces qui associent les feuillets successifs sont de nature variée et sont toujours moins fortes que les précédentes, ce qui permet parfois de séparer les feuillets.

Le cristallite comporte trois types de surface :
– les surfaces basales ;
– les surfaces latérales ;
– les surfaces interfeuillets.

L'ensemble formé par les surfaces basales et latérales constitue la surface externe ; les surfaces interfeuillets, quand elles sont accessibles à l'eau et aux cations hydratés, forment la surface interne.

Particule

La particule d'argile est un agrégat complexe de cristallites.

Arrangement textural

L'arrangement élémentaire des particules et des pores constitue l'arrangement textural.

Les particules s'organisent en unités morphologiques. On peut distinguer par exemple des structures floculées bord-face et des structures dispersées face-face (figure 1.6). L'arrangement textural est très divers. Il varie suivant les types d'argile et avec les conditions hydriques et physico-chimiques des sols.

L'étude de la microstructure des argiles par microscopie électronique à balayage et microscopie électronique par transmission (MEB et MET) permet de mettre en évidence les différents niveaux d'arrangement des textures.

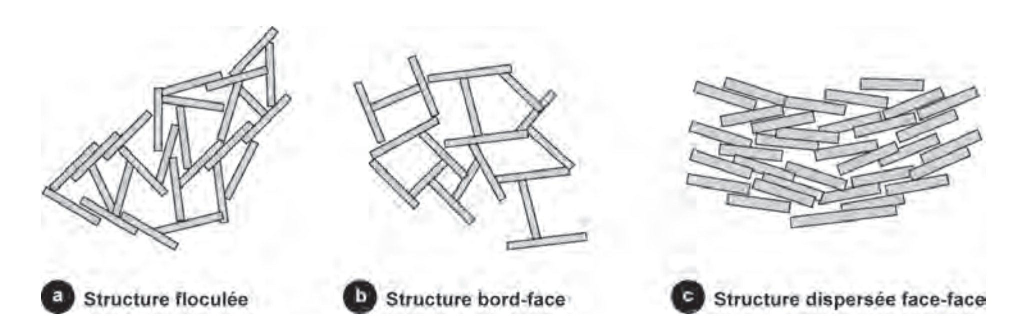


Figure 1.6. Texture des argiles

Par exemple, les images en microscopie par transmission d'une kaolinite (Vasseur *et al.*, 1995) montrent que les particules de kaolinite d'Austell sont formées par un agrégat de cristallites, eux-mêmes composés de 25 feuillets élémentaires. La figure 1.7 montre une particule formée d'agrégats de cristallites et un arrangement textural qui indique une porosité interparticulaire.

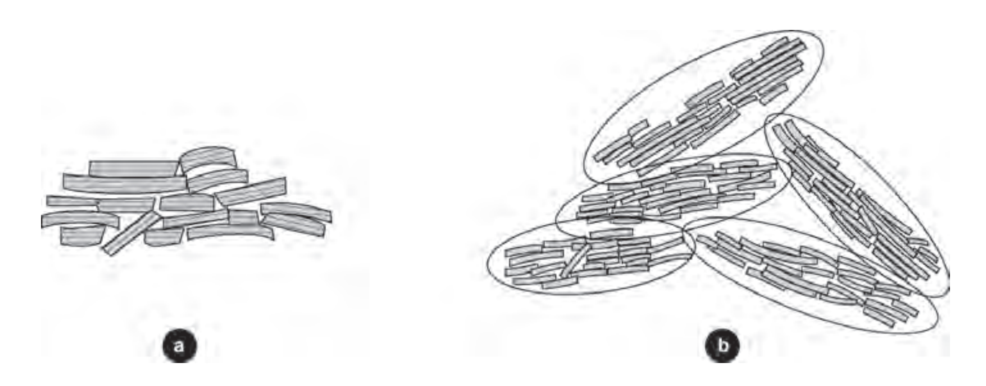


Figure 1.7. Microstructure des argiles

a. Agrégat de cristallites. b. Arrangement textural

D'après Vasseur *et al.* (1995).

La photo 1.2 permet de visualiser la microstructure d'une montmorillonite à très forte teneur en eau. L'arrangement textural est un assemblage bord à bord de particules qui constituent des rubans délimitant une porosité interparticulaire dépendant de la teneur en eau. On distinguera la porosité entre les feuillets de montmorillonite, de type interfoliaire ou intraparticulaire, et la porosité interparticulaire beaucoup plus importante.

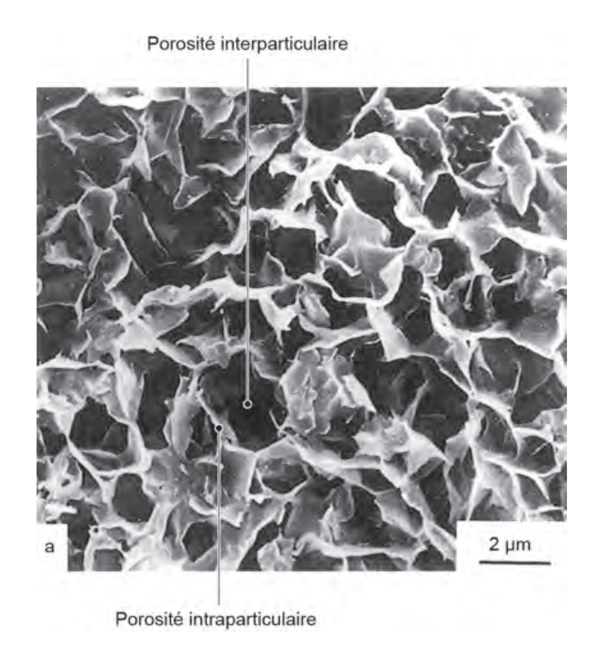


Photo 1.2. Montmorillonite à teneur en eau de 369 %

Photo MEB, D. Tessier.

1.1.3.2 Propriétés physico-chimiques des argiles

Les argiles sont soumises à des forces électrostatiques et osmotiques. Les forces électrostatiques sont présentes à la surface des feuillets, qui peuvent être chargés positivement ou négativement et attirer les molécules d'eau qui ont un comportement dipolaire.

Les forces électrostatiques proviennent de charges structurales permanentes et de charges de surface variables qui prennent naissance aux bords des feuillets.

Les charges électrostatiques structurales sont dues aux substitutions isomorphiques. Deux ions de dimension voisine peuvent se substituer l'un à l'autre sans qu'il y ait de modification fondamentale de la structure. Ces substitutions isomorphiques d'ions dans la structure des feuillets de certaines argiles créent des déficits de charges électriques qui doivent être compensés par des cations compensateurs ou cations échangeables situés dans les espaces interfoliaires. Par exemple, si on remplace dans les tétraèdres un Si^{4+} par un Al^{3+} (substitution isomorphique), des charges négatives vont apparaître sur les faces des particules (figure 1.8). Ces charges structurales sont constantes, quelles que soient les conditions physico-chimiques du milieu et toujours négatives.

Les charges électrostatiques de surface sont liées à l'hydrolyse de liens Si-O, Al-OH, le long des surfaces des feuillets. Les charges peuvent être négatives ou positives, en fonction du pH du sol.

Les forces osmotiques résultent de gradients de concentration des cations dans la phase liquide du sol.

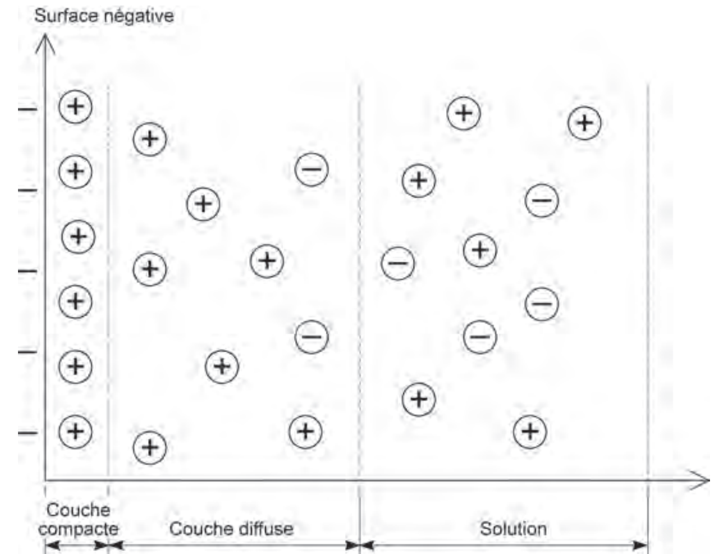


Figure 1.8. Schéma de la double couche dans le modèle de Stern

D'après Fourati (1999).

Le modèle de la double couche de Gouy-Chapman modifié par Stern rend compte de la fixation des cations et molécules d'eau dipolaires.

On considère une double couche électrique diffuse composée (voir figure 1.8) :
– d'une couche d'eau compacte, adsorbée au solide, de Stern, qui est entièrement liée à la particule par des forces électrostatiques ;
– d'une couche diffuse de Gouy et Chapman. Elle correspond à un nuage d'ions résultant de l'interaction entre l'attraction électrostatique des cations par les surfaces des particules d'argile et à la diffusion des ions qui, par des phénomènes d'osmose, auraient tendance à se distribuer de manière homogène dans l'eau. C'est cet équilibre entre les forces électrostatiques et les forces osmotiques qui conduit à la présence d'une double couche.

1.1.3.3 Étude expérimentale des caractéristiques de surface des particules d'argile

On peut obtenir les caractéristiques de surface des particules d'argile par différents essais de laboratoire. Le plus utilisé sur les chantiers est l'essai au bleu de méthylène.

Mesure de la capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) permet de quantifier les forces électrostatiques présentes sur les surfaces et les bords des feuillets argileux ; elle représente le déficit de charge de

particules exprimé par le nombre de cations attirés à la surface de l'argile et nécessaire pour atteindre l'électroneutralité. On la définit par le nombre de milliéquivalents de cations susceptibles d'être adsorbés d'une façon réversible par 100 g de sol. On notera que la CEC totale intègre l'ensemble des charges développées à la surface des différents constituants qui composent sa phase solide. Ainsi, elle prend non seulement en compte celles développées par les argiles, mais aussi celles dues à la présence de matière organique et d'oxydes/hydroxyles. La matière organique a une très forte CEC (200-400).

Le tableau 1.2 indique les surfaces interne, externe, totale et les CEC de différents types d'argile, ainsi que celui de la matière organique.

Tableau 1.2. Valeurs de la CEC de différents types d'argile et de la matière organique

D'après Morel (1996).

Constituant	**Surface interne (m^2/g)**	**Surface externe (m^2/g)**	**Surface totale (m^2/g)**	**CEC (meq/100 g)**
Kaolinite	0	10-30	10-30	3-15
Illite	20-55	80-120	100-175	20-50
Chlorite	–	100-175	100-175	10-40
Montmorillonite	600-700	80	700-800	80-150
Vermiculite	700	40-70	760	100-150
Matière organique	–	–	–	200-400

La mesure des surfaces par physisorption

La BET (Brunauer, Emmet, Teller) mesure essentiellement la surface externe des particules argileuses. Il s'agit d'une méthode d'adsorption gazeuse (azote). Les molécules d'azote qui ne pénètrent pas entre les feuillets des argiles gonflantes se fixent uniquement sur les surfaces externes.

La mesure des surfaces par chimisorption

L'adsorption chimique permet de mesurer la surface spécifique totale. Parmi les méthodes utilisées, on citera comme adsorbat l'éthylène glycol et surtout le bleu de méthylène.

L'adsorption chimique irréversible de bleu de méthylène s'effectue avec libération équivalente de cations échangeables.

On dose par des méthodes chimiques la quantité de bleu de méthylène fixé, mais on le verra aussi beaucoup plus simplement par l'essai au bleu de méthylène à la tache (voir chapitre 5).

1.1.3.4 Principaux types d'argile

Parmi les deux cents types d'argile, on pourra rencontrer dans les sols surtout des mélanges d'argiles monominérales dont les principales sont : la kaolinite, l'illite et les smectites, dont fait partie la montmorillonite.

Kaolinite

Le feuillet élémentaire est 1/1 (T-O), le cristallite élémentaire comporte quelques dizaines de feuillets (figure 1.9). La kaolinite ne présente aucune substitution isomorphique, les charges disponibles pour la fixation de cations hydratables ne se trouvant qu'en bordure des feuillets élémentaires. N'ayant pas de substitution isomorphique, les liaisons entre feuillets sont très stables et ne laissent aucune possibilité de passage aux molécules d'eau.

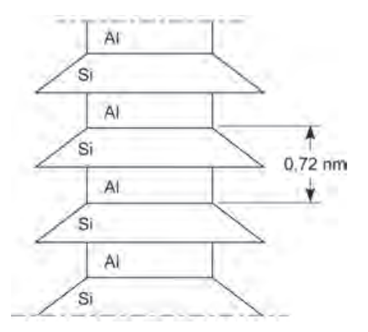


Figure 1.9. Schéma du cristallite de kaolinite

La largeur de la particule est de l'ordre de 1 µm et son épaisseur de l'ordre de 0,1 µm. La kaolinite se présente sous forme de plaquettes rigides (photo 1.3).



Photo 1.3. Cliché de la microstructure du kaolin d'Arvor

D'après Fourati (1999).

Illite

Le feuillet élémentaire est 2/1 (T-O-T). Dans les couches tétraédriques, un cation Si^{4+} sur quatre est remplacé par un cation Al^{3+}. Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions potassiums K^+ anhydres situés entre les feuillets. Ce potassium bloque toute hydratation et expansion foliaire (figure 1.10).

Le cristallite d'illite comporte une dizaine de feuillets qui lui donne une largeur de l'ordre de 0,3 µm et une épaisseur de l'ordre de 10 nm.

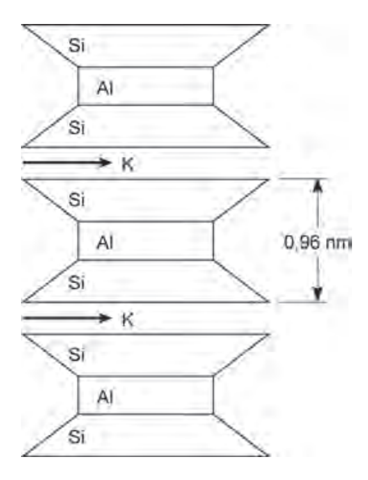


Figure 1.10. Schéma du cristallite d'illite

Smectites

La famille des smectites comprend, entre autres, la montmorillonite et la beidellite. Le terme bentonite est utilisé pour tout matériau argileux contenant au moins 60 % de montmorillonite. Le feuillet élémentaire est 2/1 (T-O-T) (figure 1.11).

Pour la montmorillonite, le déficit de charge interne aux feuillets est provoqué par des substitutions de cations Al^{3+} en couche octaédrique par des cations Mg^{2+}. Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des cations hydratés échangeables, tels que Na^+ ou Ca^{2+}, localisés entre les feuillets (voir figure 1.11). L'épaisseur des feuillets dépendra donc de l'état d'hydratation.

Le nombre de feuillets du cristallite dépend des paramètres minéralogiques, de la nature des cations échangeables et de la concentration en sels de la solution. L'arrangement textural est un assemblage bord à bord de particules primaires qui constituent des rubans plus ou moins « chiffonnés ».

Le mécanisme de l'hydratation est dominé dans les montmorillonites par la porosité interfoliaire ou intraparticulaire et la porosité interparticulaire. La photo 1.4 montre la microstructure d'une montmorillonite Na^+ à trois teneurs en eau, 369 %, 114 % et 82 %, sous des succions

respectivement égales à 3,2 kPa, 0,1 MPa, 1 MPa. À la teneur en eau de 369 %, le diamètre des pores interparticulaires est de l'ordre de 1 à 2 µm ; pour des teneurs en eau plus faibles, on observe clairement un tassement très important des pores interparticulaires.

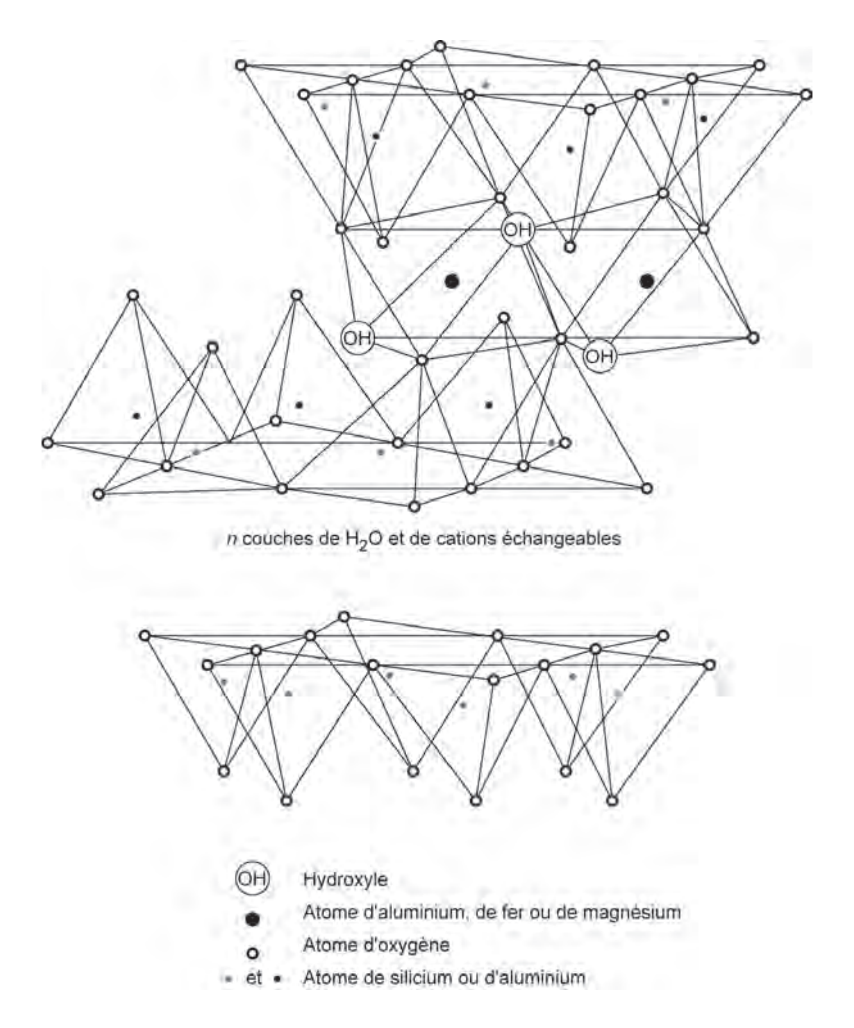


Figure 1.11. Structure du cristallite de montmorillonite

Interstratifié

Les interstratifiés sont formés par l'alternance de feuillets appartenant à deux familles d'argile différentes : illite-montmorillonite, par exemple. On en trouve une illustration dans les minéraux argileux contenus dans les argiles vertes de Romainville, qui sont représentés par de l'illite, de la kaolinite, de la montmorillonite et des interstratifiés illite-montmorillonite.

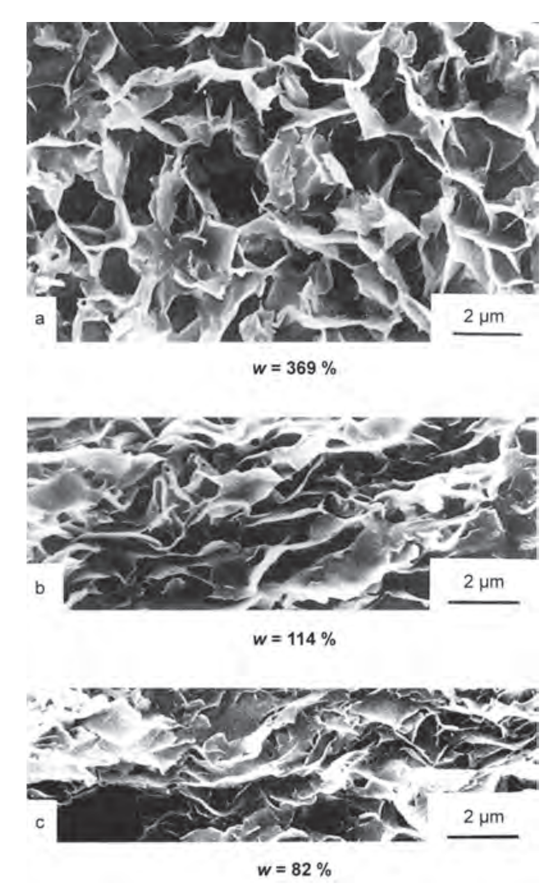


Photo 1.4. Évolution de la microstructure d'une montmorillonite à trois teneurs en eau

D'après Tessier (1995).

1.1.3.5 Matériaux argileux

Dans les travaux géotechniques, il est très rare de trouver des argiles monominérales ; le sol argileux comporte presque toujours plusieurs types d'argile.

Plus généralement encore, le sol peut être composé d'argile et de fractions plus grossières : limon, sable, gravier. On considère qu'il suffit de 30 % d'argile dans un sol pour que celle-ci impose ses propriétés à l'ensemble du sol.

À taux d'argile comparable, la nature des minéraux argileux est d'une importance capitale ; on peut également considérer que 30 à 40 % de montmorillonite dans un mélange argileux sont suffisants pour que la montmorillonite confère ses caractéristiques à l'ensemble du mé-

Table des matières

Achevé d’imprimer sur les presses de Jouve à Mayenne
N° d’imprimeur : 2620625H
Dépôt légal : septembre 2017

Imprimé en France

Théorie et pratique de la géotechnique

Tome 1

Avant de concevoir et dimensionner les ouvrages liés au sol ou souterrains, un ensemble de connaissances en géosciences est indispensable pour établir un modèle géotechnique.

L'objectif de ce livre est de fournir les outils pour élaborer ce modèle. Avec celui-ci, les professionnels peuvent ensuite aborder la conception, le dimensionnement et le calcul des ouvrages.

L'analyse débute par les études géologiques et hydrogéologiques nécessaires à la description et à la compréhension d'un site naturel sur lequel insérer un ouvrage. Ensuite, les reconnaissances géophysiques et géologiques permettent d'identifier les sols, de les classer et d'aboutir à l'élaboration d'un modèle géologique et hydrogéologique. Puis la mécanique des sols traite des sols saturés mais également des sols non saturés et analyse les principales lois de comportement utilisées par les professionnels. Les essais en laboratoire et *in situ*, décrits dans l'ouvrage, déterminent les paramètres de ces lois.

Les bases complètes pour dimensionner tout type de soutènement sont exposées, puis sont fournis les outils nécessaires pour vérifier la stabilité générale de tous les ouvrages et les éléments permettant le dimensionnement de la stabilité des sols renforcés. De nombreuses applications, souvent complétées par des calculs utilisant la méthode aux éléments finis, sont proposées pour mettre en pratique les théories qui sont développées.

Cette nouvelle édition prend en compte l'évolution de la pratique géotechnique, des normes, en particulier de la norme NF P 94-500 sur les missions d'ingénierie géotechnique.

Ce traité s'adresse aussi bien aux géotechniciens des bureaux d'études et des entreprises souhaitant maîtriser et optimiser la géotechnique qu'aux étudiants et élèves-ingénieurs désirant s'initier à la théorie et à la pratique de la géotechnique.

Claude Plumelle a assuré la direction de l'ouvrage. Ont participé à la rédaction :

Yu Jun Cui, professeur à l'école des Ponts ParisTech (ENPC).

Denis Fabre, professeur à la chaire de géotechnique du Cnam.

Olivier Fouché, maître de conférences à la chaire de géotechnique du Cnam.

Alain Hirschauer, expert judiciaire.

Claude Plumelle, professeur honoraire du Cnam.

Alain Tabbagh, professeur émérite à l'université Sorbonne Université.

Sommaire

EXPERTISE TECHNIQUE

EDITIONS LE MONITEUR

ISSN 2262-5089
ISBN 978-2-281-14026-2

9 782281 140262